

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
щодо виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни
«Енергоефективний електропривод»
для студентів зі спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка».

Затвержено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № —від ————.
Харків

НТУ «ХПІ»

Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Енергоефективний електропривод» для студентів для студентів зі спеціальності 6.05070101 – 141 «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка». ІЕЕЕ / укл. Д. А. Шокарьов. – НТУ «ХП», 2016. - 41с.

Укладач: Д. А. Шокарьов

Рецензент: К. В. Махотило

Кафедра електричні станції

ВСТУП

Мета дисципліни “Енергоефективний електропривод” полягає в підготовці інженерів широкого профілю, здатних самостійно і творчо розв’язувати задачі проектування, дослідження, налагодження й експлуатації сучасних автоматизованих електроприводів і систем автоматизації промислових установок і технологічних комплексів у будь-яких галузях народного господарства.

Дисципліна базується на попередніх курсах «Вища математика», «Теорія електропривода», «Теорія автоматичного управління», «Електричні машини».

Мета проведення лабораторних занять полягає в закріпленні знань, отриманих на лекціях шляхом дослідження властивостей і характеристик електромеханічних систем, систем електроприводу на цифрових обчислювальних машинах. Придбати досвід моделювання електромеханічних систем та систем електроприводу за лінійними та нелінійними системами диференційних рівнянь.

Внаслідок проведення лабораторних занять студенти повинні засвоїти принципи побудови моделей електромеханічних систем з урахуванням їх властивостей та дослідження на ЕОМ; вміти розраховувати необхідні для моделювання параметри систем диференційних рівнянь, оцінювати якість вирішення та вибір необхідного способу інтегрування, навчитися складати математичні моделі типових промислових технологічних об'єктів та виконувати їх розрахунок.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

СКЛАДАННЯ СТРУКТУРНИХ СХЕМ ЗА ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМИ РІВНЯННЯМИ ТА ЇХ СИСТЕМАМИ

МЕТА: складання структурної схеми диференціального рівняння другого порядку та його дослідження. Складання структурної схеми системи диференціальних рівнянь

1.1 Теоретичні відомості

Математичний опис великого класу задач виконується за допомогою диференціальних рівнянь. При розв'язанні задач за допомогою структурного моделювання найчастіше використовують метод зниження похідної.

Розглянемо метод зниження порядку похідної на прикладі розв'язання диференціального рівняння 2-го порядку з постійними коефіцієнтами:

$$A_2 x'' + A_1 x' + A_0 x = y,$$

де A_1 , A_2 , A_0 - постійні числа більші 0; y - постійне число або функція часу, тобто $y = f(t)$ - примусова функція.

Розв'язуємо рівняння відносно вищої похідної:

$$x'' = ay - a_0 x - a_1 x',$$

$$\text{де } a = \frac{1}{A_2}; \quad a_0 = \frac{A_0}{A_2}; \quad a_1 = \frac{A_1}{A_2}.$$

Таким чином, друга похідна дорівнює сумі всіх інших членів рівняння.

Структурна схема складається з комплексу операційних блоків, з'єднавши котрі певним чином, можна одержати рішення задачі.

Розв'язання диференціального рівняння у вигляді структурної схеми має вигляд, наведений на рис.1.1.

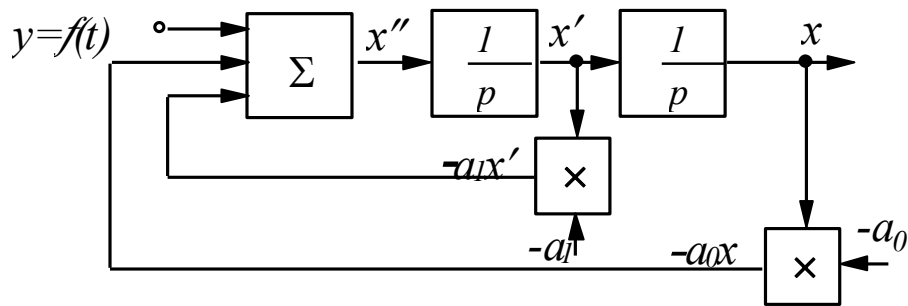


Рисунок 1.1 - Структурна схема розв'язання диференціального рівняння

Метод зниження похідної аналогічним чином можна застосовувати і для розв'язання систем диференціальних рівнянь. Розглянемо складання структурної схеми для системи диференціальних рівнянь, що відповідає електричній машині постійного струму незалежного збудження, яка записана у відносних одиницях:

$$l \frac{di}{d\tau} = u - i \cdot r - v;$$

$$j \frac{dv}{d\tau} = i - m_c.$$

Структурну схему отримаємо послідовним з'єднанням пропорційних, сумуючих та інтегруючих блоків.

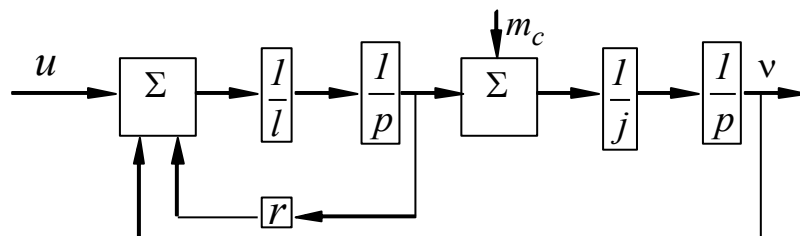


Рисунок 1.2 - Структурна схема розв'язання системи 2-х диференціальних рівнянь

1.2 Порядок виконання роботи

1. Використовуючи структурну схему (рис.1.1), знайти рішення диференціального рівняння для значень коефіцієнтів, які задані викладачем.
2. Дослідити перехідний процес і підібрати параметри рівняння таким чином, щоб отримати: аперіодичний процес, аперіодичний процес другого порядку, незатухаючі коливання.

3. Для системи диференціальних рівнянь, яка задана викладачем, скласти структурну схему моделі та знайти рішення.

1.3 Зміст звіту

Зміст повинен містити:

1. назву роботи, її мету;
2. необхідні розрахунки параметрів моделей;
3. структурні схеми моделей;
4. результати рішення в графічному вигляді;
5. висновки.

1.4 Питання для підготовки до захисту лабораторної роботи

1. У якій послідовності виконується розв'язування системи диференціальних рівнянь на ЕОМ?
2. Назвіть методи інтегрування диференціальних рівнянь.
3. У чому полягає суть методу зниження порядку похідної?
4. Назвіть форми представлення динамічних об'єктів та наведіть приклади переходу з однієї форми до іншої.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ПРУЖНОСТЯМИ

МЕТА: дослідження механічної системи з пружностями без урахування та з урахуванням зазору в механічній передачі

2.1 Теоретичні відомості

Розглянемо механічну двомасову систему з урахуванням пружностей механічних з'єднань за структурною схемою рис.2.1.

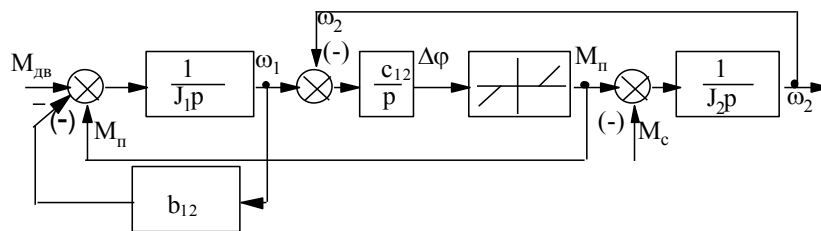


Рисунок 2.1 - Структурна схема двомасової системи з урахуванням пружностей

Часто впливом моменту внутрішнього тертя на валу, що деформується, можна знехтувати, оскільки істотнішим є момент зовнішнього тертя, викликаного навантаженням.

Найбільші труднощі при моделюванні викликає розрахунок пружностей механічних з'єднань. Розрахунок деяких коефіцієнтів c_{12} можна виконати за наступними виразами:

- для сталевих валів

$$c_{12} = \frac{\pi}{32} G \frac{d^4}{l},$$

де $G = 8.7 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$; $G = 8.53 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$; d, l - діаметр і довжина вала, см;

- для сталевих канатів (лінійна деформація) під час багаторазового підйому

$$c_{12} = \frac{1.11 \cdot 10^8 m}{160 H_k - 10^{-4} m H_k^2},$$

де H_k - довжина каната, м; m - запас пружності каната.

Структурну схему моделі при використанні розширення пакета MATLAB-SIMULINK наведено на рис.2.2. До схеми введений елемент, що

дозволяє врахувати наявність зазору в кінематичному колі. На рис.2.3,2.4 наведено приклади розрахунків коливань кутових швидкостей: ω_1 — кутова швидкість першої маси; ω_2 - кутова швидкість другої маси, на рис.2.3 без урахування зазору, на рис.2.4 з урахуванням зазору.

Дуже важливим є добір кроку інтегрування, оскільки від цього залежить обсяг обчислень і точність отриманого результату. Орієнтиром у цьому питанні можуть бути динамічні властивості системи, що визначають резонансними частотами:

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{c_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}} = \sqrt{\frac{c'_{12}(m_1 + m_2)}{m_1 \cdot m_2}}.$$

Для тримасової механічної системи визначають також частоту вільних коливань при взаємодії другої та третьої мас:

$$\Omega_{23} = \sqrt{\frac{c_{23}(J_2 + J_3)}{J_2 \cdot J_3}} = \sqrt{\frac{c'_{23}(m_2 + m_3)}{m_2 \cdot m_3}}.$$

Для кожного коливання потрібно розрахувати не менше як 25-30 точок, тобто крок інтегрування вважається таким:

$$h = \left(\frac{1}{25} \div \frac{1}{30} \right) \frac{2\pi}{\Omega_m},$$

де Ω_m - більша з частот.

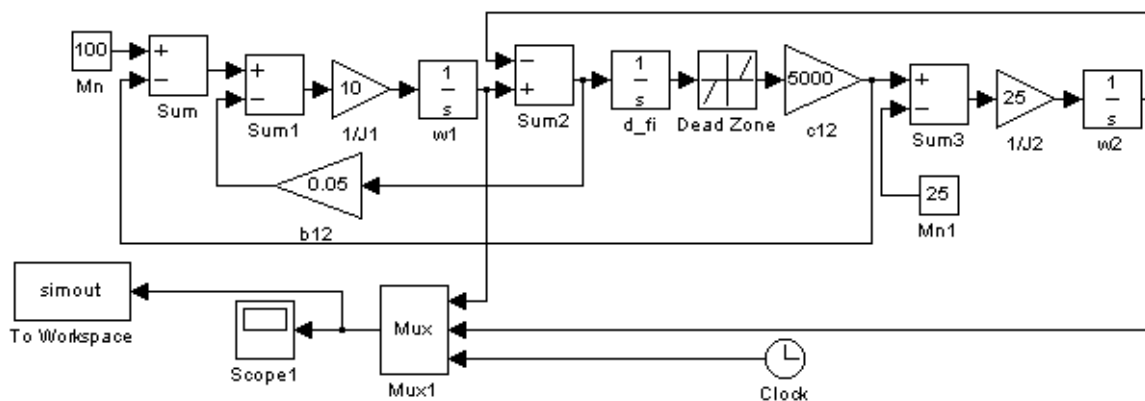


Рисунок 2.2 - Структурна схема моделі в пакеті MATLAB - SIMULINK

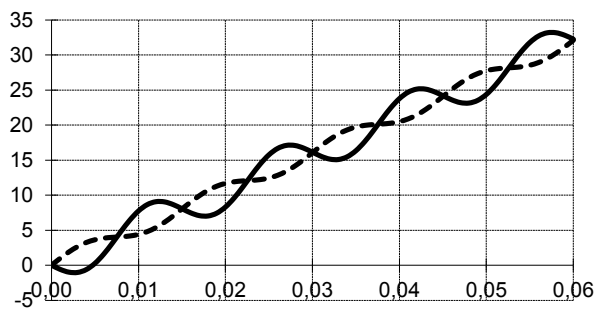


Рисунок 2.3 – Залежність коливань

кутових швидкостей без урахування
зазору

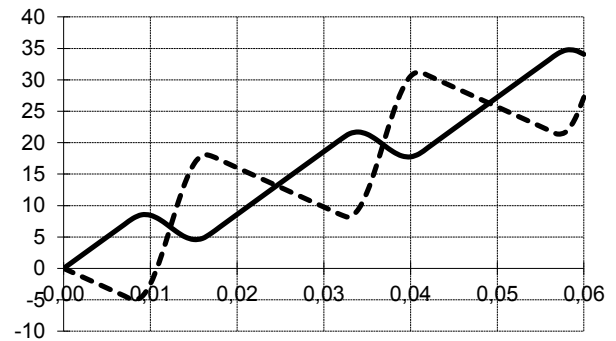


Рисунок 2.4 - Залежність коливань

кутових швидкостей з урахуванням
зазору

2.2 Порядок виконання роботи

1. Розрахувати коефіцієнти структурної схеми та частоту коливань системи за даними викладача.
2. У пакеті MATLAB - SIMULINK набрати структурну схему моделі без урахування зазору та виконати її розрахунок.
3. Ввести до структурної схеми ланку, що зумовлює наявність зазору. Виконати розрахунок динамічних режимів системи.
4. Порівняти отримані результати і зробити висновки.

2.3 Зміст звіту

1. Таблиці вихідних даних, які запропоновані викладачем.
2. Розрахунки коефіцієнтів та частот коливань.
3. Структурні схеми для всіх варіантів досліджень.
4. Графіки динамічних режимів кутової швидкості обох мас та моментів, для всіх варіантів досліджень.
5. Висновки.

2.4 Питання для підготовки до захисту лабораторної роботи

1. Наведіть спрощену схему еквівалентної двомасової системи з пружним зв'язком.
2. Наведіть структурну схему двомасової системи з пружностями без урахування зазору.
3. Запишіть систему диференціальних рівнянь для двомасової системи з пружностями без урахування зазору.
4. Наведіть структурну схему двомасової системи з пружностями з урахуванням зазору.
5. Запишіть систему диференціальних рівнянь для двомасової системи з пружностями з урахуванням зазору.
6. Як впливає зазор на динаміку механічної системи з урахуванням та без урахування моменту опору?
7. Дайте рекомендації до вибору кроку інтегрування з урахуванням частот власних коливань системи з пружним зв'язком.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

МОДЕЛЮВАННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ

МЕТА: дослідження лінеаризованої моделі ДПС незалежного збудження при незмінному магнітному потоці; дослідження лінеаризованої моделі ДПС незалежного збудження при регульованому магнітному потоці

3.1 Теоретичні відомості

Активний опір якорної обмотки:

$$R = \alpha \frac{U_H}{I_H} \left(\frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \right),$$

де $\alpha=0.3 \div 0.5$ - для двигунів постійного струму незалежного збудження; $\alpha=0.6$ для двигунів постійного струму змішаного збудження; $\alpha=0.75$ для двигунів постійного струму послідовного збудження.

Індуктивність обмотки якоря визначають відповідно до формули Уманського:

$$L_{\text{я}} = k \frac{U_H}{I_H} \frac{60}{2\pi p n_H} = k \frac{U_H}{I_H} \frac{1}{p \omega_H},$$

де $k=0.2 \div 0.25$ - для компенсованих машин; $k=0.5 \div 0.6$ - для некомпенсованих машин.

Постійну часу обмотки збудження можна визначити за формулою Жуільяра:

$$T_B = \sqrt{\frac{1000 P_H \pi}{30 \omega_H (2p)^2}}$$

Момент інерції (кг м^2): $J = 1.5 \cdot 10^{-4} (M_n)^{1.5}$;

Електромагнітна постійна часу $T_e = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$.

3.2 Порядок виконання роботи

1. Використовуючи структурну схему (рис.3.1), виконати моделювання на ЕОМ режимів пуску ДПС незалежного збудження при ввімкненні на повну напругу при активному й реактивному моментах навантаження (момент навантаження взяти таким, що дорівнює номінальному).
2. На основі структурної схеми (рис.3.1) скласти структурну схему ДПС незалежного збудження при реостатному пуску в дві ступені й виконати моделювання. Контрольований параметр (час, струм або швидкість) задається викладачем.
3. На основі структурної схеми (рис.3.1) скласти структурну схему ДПС незалежного збудження при пуску з регульованою напругою й виконати моделювання. Зміна напруги здійснюється за допомогою задатчика. Час розгорнення задається викладачем.
4. На основі структурної схеми (рис.3.1) скласти структурну схему ДПС незалежного збудження з регульованим збудженням і виконати моделювання ДПС паралельного збудження при ввімкненні на повну напругу при активному й реактивному моментах навантаження (момент навантаження взяти таким, що дорівнює номінальному).

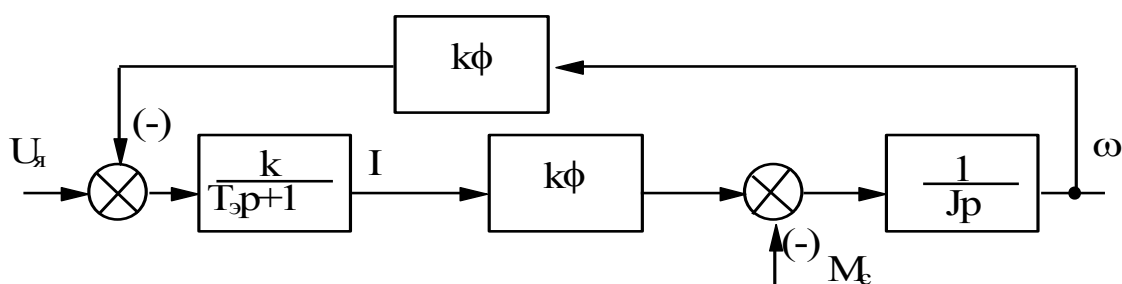


Рисунок 3.1 – Структурна схема лінеаризованої моделі двигуна постійного струму

3.3 Зміст звіту

1. Найменування роботи та її мета.
2. Розрахунок параметрів і коефіцієнтів моделі.

3. Структурні схеми й системи диференціальних і алгебраїчних рівнянь для п.п. 1-4.
4. Графіки перехідних процесів $I(t)$, $M(t)$, $\omega(t)$ для п. п. 1-4.
5. Висновки.

3.4 Питання для підготовки до захисту лабораторної роботи

1. Наведіть принципову схему і схему заміщення двигуна постійного струму.
2. Які спрощення допустимі при моделюванні двигунів постійного струму?
3. Наведіть структурну схему і диференціальні рівняння двигуна постійного струму незалежного збудження.
4. Наведіть структурну схему і диференціальні рівняння двигуна постійного струму послідовного збудження.
5. Наведіть структурну схему і диференціальні рівняння двигуна постійного струму змішаного збудження.
6. Наведіть математичні моделі обмоток збудження.
7. Наведіть математичні моделі та методи моделювання кривої намагнічування.
8. Наведіть структурну схему і диференціальні рівняння двигуна постійного струму незалежного збудження при регулюванні магнітного потоку.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА ЛІНЕАРИЗОВАНОЮ МОДЕЛЛЮ

МЕТА: дослідження лінеаризованої моделі АД

4.1 Теоретичні відомості

Одними з найважливіших параметрів, що характеризують номінальний режим АД, є відповідні номінальні значення наведеного струму ротора $I'_{2ном}$ і струму намагнічування $I_{\mu ном}$. Оскільки при переході від ідеального холостого ходу ($s=0$) до номінального режиму ($s=s_n$) магнітний потік практично не змінюється, то $I_{\mu ном}$ можна взяти таким, що дорівнює струму холостого ходу $I_{\mu х}$, який вимірюється при роботі двигуна без навантаження на валу.

Визначимо значення $I'_{2ном}$, $I_{\mu ном}$, використовуючи паспортні дані номінального струму статора $I_{1ном}$, кратність максимального моменту λ_m і номінального коефіцієнта потужності $\cos \varphi_{ном}$.

На підставі основних співвідношень і векторної діаграми АД, а також з урахуванням рівнянь для критичного ковзання

$$\frac{s_K}{s_H} = \lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}$$

можна одержати:

$$I'_{2ном} \approx I_{1ном} \cos(\varphi_{ном}) \sqrt{\frac{2\lambda_M}{\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}}} = I_{1ном} \cos \varphi \sqrt{\frac{2\lambda s_M}{s_k}}$$

$$I_{\mu.ном} \approx I_{1ном} \left(\sin(\varphi_{ном}) - \frac{\cos(\varphi_{ном}) s_k}{S_k} \right).$$

При $\lambda_m > 1.7$ можна прийняти:

$$I_{\mu.ном} \approx I_{1ном} \cos(\varphi_{ном}),$$

оскільки похибка із попередньою формулою не перевищує 5%.

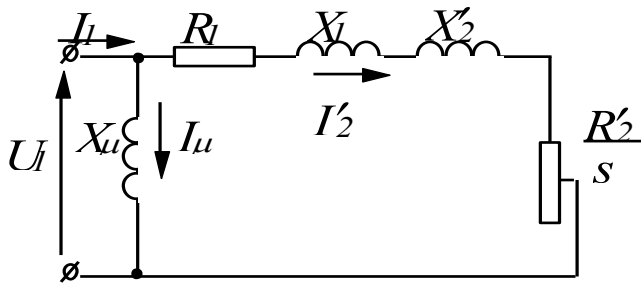


Рисунок 4.1 – Г-подібна схема

заміщення

У каталогах звичайно наводять кратності пускового

моменту $\lambda_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{ном}}$ й

пускового струму

$k_i = \frac{I_{\Pi}}{I_{ном}} = \frac{I_K}{I_{1,ном}}$. За цими і

зазначеним вище даними можна

визначити відсутні параметри Г-

подібної схеми заміщення (рис.4.1).

За кратністю пускового моменту λ_n визначимо наведений активний опір ротора при $s=1$:

$$R_2^{\parallel} = \frac{(P_{ном} + \Delta P_{мех}) \lambda_n}{3(1 - s_{ном})(I_{2k}^{\parallel})^2} \approx \frac{\lambda_n (P_{ном} + \Delta P_{мех})}{3(1 - s_{ном}) k_i^2 I_{1,ном}^2}.$$

Якщо невідомо активний опір статора, то з достатнім ступенем точності можна прийняти:

$$R_1 = \frac{U_{1,ном}^2 (1 - s_{ном})}{2C_1 (P_{ном} + \Delta P_{мех}) \lambda_m \left[1 + \frac{C_1}{s_k} \right]},$$

де $C_1 = 1.02 \div 1.06$ - коефіцієнт насичення магнітного кола.

При номінальній напрузі статора 220-380 В отримане значення опору варто збільшити в 1.3-1.8 рази.

Індуктивний опір статора й ротора при $s=1$ без урахування струму намагнічування, не завжди дає позитивний результат, тому краще скористатися виразом для критичного ковзання й з нього одержати значення x_k .

$$s_k = \frac{R_2^{\parallel}}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}.$$

Індуктивний опір контуру намагнічування:

$$X_{\mu} = \frac{U_{1,ном}}{\sqrt{3} I_{\mu,ном}}.$$

Жорсткість механічної характеристики:

$$\beta = \frac{M_k}{s_k \omega_0}.$$

Для урахування часу протікання електромагнітних процесів введемо електромагнітну постійну часу:

$$T = \frac{1}{\omega_s s_K} = \frac{X_K}{\omega_s R_2'} = \frac{L_K}{R_2'}.$$

Момент інерції (кг м^2) для асинхронних машин $J = 8750 \cdot P_n / (n_n)^2$.

4.2 Порядок виконання роботи

1. Використовуючи структурну схему (рис.4.2), виконати моделювання на ЕОМ режимів пуску АД при ввімкненні на повну напругу при активному й реактивному моментах навантаження (момент навантаження взяти таким, що дорівнює номінальному). Довести неадекватність лінеаризованої моделі АД для режиму прямого асинхронного пуску.
2. На основі структурної схеми (рис.4.2) скласти структурну схему АД при реостатному пуску у дві ступені й виконати моделювання. Контрольований параметр (час або швидкість) задає викладач.
3. На основі структурної схеми (рис.4.2) скласти структурну схему АД при пуску з регульованими напругою й частотою й виконати моделювання. Зміна напруги й частоти здійснюється за допомогою задатчика. Закон регулювання й час розгорнення задається викладачем.

Структурна схема АД у межах лінійної ділянки характеристики:

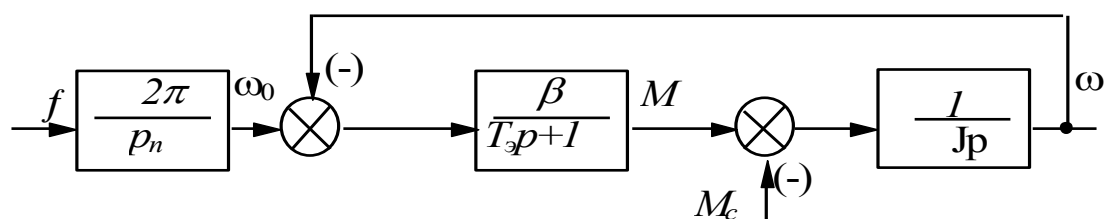


Рисунок 4.2 – Структурна схема лінеаризованої моделі АД

4.3 Зміст звіту

1. Найменування роботи та її мета.
2. Розрахунок параметрів і коефіцієнтів моделі.
3. Структурні схеми й системи диференціальних і алгебраїчних рівнянь для п.п. 1-3.
4. Графіки перехідних процесів $M(t)$, $\omega(t)$ для п. п. 1-3.
5. Висновки.

4.4 Питання для підготовки до захисту лабораторної роботи

1. Наведіть схему заміщення асинхронного двигуна.
2. Наведіть структурну схему і диференціальні рівняння лінеаризованої моделі асинхронного двигуна.
3. Яку обмеженість має лінеаризована модель АД?
4. Поясніть недопустимість моделювання прямого пуску асинхронного двигуна на лінеаризованій моделі?
5. Запишіть основні вирази для визначення параметрів асинхронного двигуна.
6. Запишіть вираз для механічної характеристики АД.
7. Як розраховується жорсткість механічної характеристики АД?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

МОДЕЛЮВАННЯ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА ЛІНЕАРИЗОВАНОЮ МОДЕЛЛЮ

МЕТА: дослідження лінеаризованої моделі СД

5.1 Теоретичні відомості

Лінеаризовану модель синхронного двигуна (СД) одержимо на підставі відомого рівняння кутової характеристики трифазного явнополюсного двигуна:

$$M = \frac{3U_{\phi} E}{\omega_0 X_d} \sin \theta + \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta.$$

Це рівняння свідчить про те, що момент СД складається із двох складових: синхронної й реактивної (асинхронної).

З аналізу рівняння кутової характеристики видно, що робочу ділянку

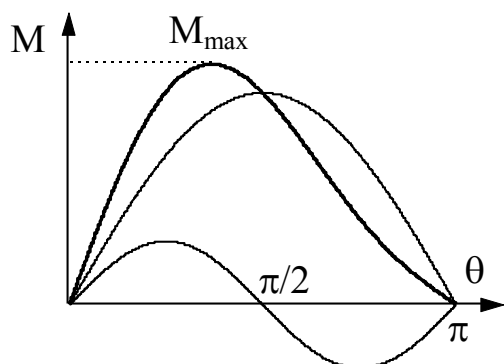


Рисунок 5.1 - Кутова характеристика явнополюсного СД

кутової характеристики $M=f(\theta)$ можна замінити лінійною залежністю, що проходить через точку номінального режиму:

$$M = \frac{M_n}{\theta_n} \theta = b\theta, \quad M < 0.9M_{max}.$$

Диференціюючи, одержимо наближене рівняння динамічної механічної характеристики:

$$\frac{dM}{dt} = b(\omega_0 - \omega).$$

З урахуванням останнього рівняння для кутової механічної характеристики можна записати:

$$M = M_{син} + M_{асин} = b\theta + \beta(\omega_0 - \omega),$$

де $b = \frac{M_n}{\theta_n}, \quad \beta = \frac{2 M_k}{s_k \omega_o}.$

Момент інерції (кгм^2) для синхронних машин: $J = 20500 \frac{(P_n \cdot 10^{-3})^{1.26}}{n_n^2}.$

5.2 Порядок виконання роботи

1. Використовуючи структурну схему (рис.5.2), виконати моделювання на ЕОМ режимів пуску СД при ввімкненні на повну напругу при активному й реактивному моментах навантаження (момент навантаження взяти таким, що дорівнює номінальному). Довести неадекватність лінеаризованої моделі СД для режиму прямого асинхронного пуску.
2. На основі структурної схеми (рис.5.2) скласти структурну схему СД при пуску з регульованими напругою й частотою й виконати моделювання. Зміна напруги й частоти здійснюється за допомогою задатчика. Закон регулювання й час розгорнення задає викладач.
3. На основі структурної схеми (рис.5.2) скласти структурну схему СД із регульованим збудженням і здійснити регулювання після виходу на номінальну кутову швидкість.

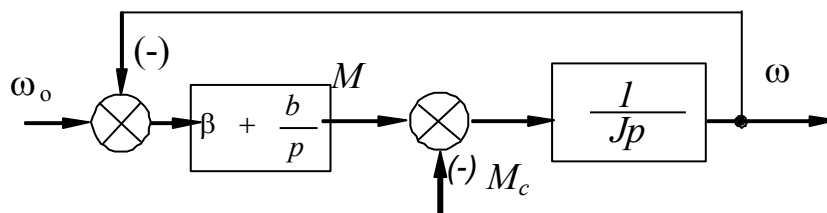


Рисунок 5.2 – Структурна схема лінеаризованої моделі СД

5.3 Зміст звіту

1. Найменування роботи та її мета.
2. Розрахунок параметрів і коефіцієнтів моделі.
3. Структурні схеми й системи диференціальних і алгебраїчних рівнянь для п.п. 1-4.

4. Графіки перехідних процесів $M(t)$, $\omega(t)$ для п. п. 1-3 і додатково $I_f(t)$ для п. 4.
5. Висновки.

5.4 Питання для підготовки до захисту лабораторної роботи

1. Наведіть схему заміщення синхронного двигуна.
2. Наведіть структурну схему і диференціальні рівняння синхронного двигуна.
3. Яку обмеженість має лінеаризована модель СД?
4. З яких складових складається момент синхронного двигуна.
5. Запишіть вираз для кутової характеристики СД.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАМКНУТИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ІЗ ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ

МЕТА: дослідження лінеаризованої моделі системи із загальним суматором з ДПС незалежного збудження. Дослідження лінеаризованої моделі двоконтурної системи підпорядкованого регулювання із ДПС незалежного збудження.

6.1 Теоретичні відомості

Активний опір якірної обмотки:

$$R = \alpha \frac{U_H}{I_H} \left(\frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \right),$$

де $\alpha=0.3 \div 0.5$ для двигунів постійного струму незалежного збудження; $\alpha=0.6$ для двигунів постійного струму змішаного збудження; $\alpha=0.75$ для двигунів постійного струму послідовного збудження.

Індуктивність обмотки якоря визначається відповідно до формули Уманського:

$$L_{\text{я}} = k \frac{U_H}{I_H} \frac{60}{2\pi p n_H} = k \frac{U_H}{I_H} \frac{1}{p \omega_H},$$

де $k=0.2 \div 0.25$ - для компенсованих машин; $k=0.5 \div 0.6$ - для некомпенсованих машин.

Постійну часу обмотки збудження можна визначити за формулою Жуільяра:

$$T_B = \sqrt{\frac{1000 P_H \pi}{30 \omega_H (2p)^2}}.$$

Момент інерції (кг м^2): $J = 1.5 \cdot 10^{-4} (M_H)^{1.5};$

Електромагнітна постійна часу: $T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}.$

Тиристорний перетворювач представляють передавальною функцією

$$W_{\mu}(p) = \frac{k_{\mu}}{T_{\mu}p + 1},$$

де постійна часу тиристорного перетворювача $T_{\mu} = 0.01$.

Структурна схема електропривода із загальним суматором має вигляд, показаний на рис. 6.1.

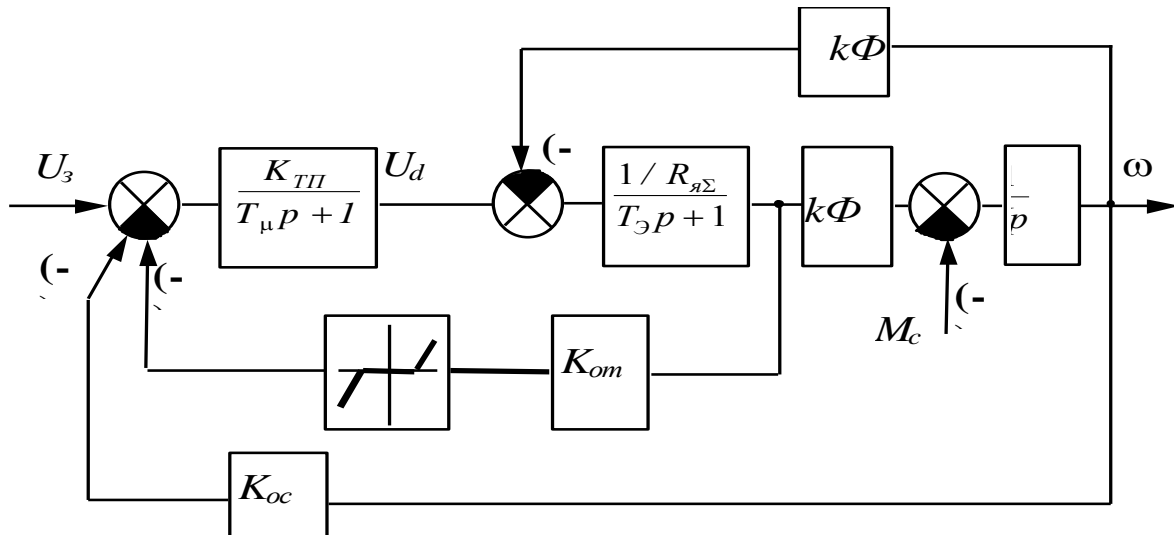


Рисунок 6.1 – Структурна схема електропривода із загальним суматором

Розрахунок коефіцієнтів структурної схеми виконують за відомими методиками.

Структурна схема двоконтурної САК електроприводом за системою має вигляд (рис.6.2).

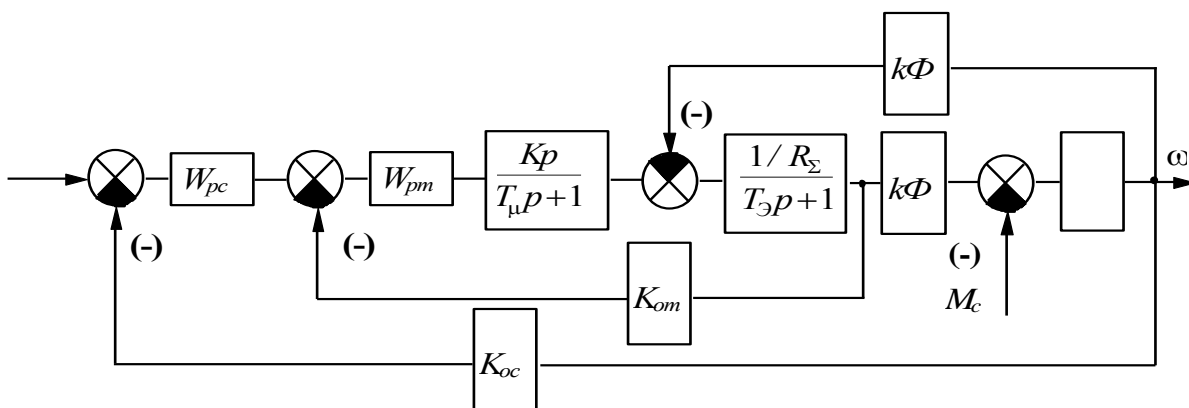


Рисунок 6.2 – Структурна схема двоконтурної САК

6.2 Порядок виконання роботи

1. Використовуючи структурну схему (рис.6.1), виконати моделювання на ЕОМ режимів пуску ДПС незалежного збудження при ввімкненні на повну напругу при реактивному моменті навантаження (момент навантаження взяти таким, що дорівнює номінальному, значення струму відсічення взяти таким, що дорівнює двократному від номінального).
2. За складеною математичною моделлю виконати моделювання:
 - зміна напруги задання вбік зменшення, а потім - збільшення.
 - зміна навантаження на валу вбік зменшення, а потім - збільшення;
3. На основі структурної схеми (рис.6.2) виконати моделювання за п.п.1-2. Параметри регуляторів або необхідні показники регулювання задає викладач.

6.3 Зміст звіту

1. Найменування роботи та її мета.
2. Розрахунок параметрів і коефіцієнтів моделей.
3. Структурні схеми й системи диференціальних і алгебраїчних рівнянь для п.п. 1-3.
4. Графіки перехідних процесів $I(t)$, $M(t)$, $\omega(t)$ для п. п. 1-3.
5. Висновки.

6.4 Питання для підготовки до захисту лабораторної роботи

1. Які існують основні структури замкнутих систем автоматичного керування електроприводами?
2. У чому полягає суть побудови САК із загальним суматором?
3. Наведіть структурну схему САК із загальним суматором.
4. У чому полягає суть побудови САК підпорядкованого керування?
5. Наведіть структурну схему системи підпорядкованого керування.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В ОРТОГОНАЛЬНІЙ СИСТЕМІ КООРДИНАТ α, β

МЕТА: дослідження режимів пуску і зміни навантаження на моделі АД в ортогональній системі координат α, β

7.1 Теоретичні відомості

Для розрахунку динамічних режимів та моделювання АД у координатній системі α, β найзручніше використати запис системи диференціальних рівнянь записаних відносно потокозчеплень. Така модель може бути отримана шляхом підстановки залежностей струмів від потокозчеплень та приведення її до форми Коши і має вигляд:

$$\frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} = U_{\alpha s} - AR_s(\psi_{\alpha s}L'_r - \psi_{\alpha r}L_\mu);$$

$$\frac{d\psi_{\beta s}}{dt} = -U_{\beta s} - AR_s(\psi_{\beta s}L'_r - \psi_{\beta r}L_\mu);$$

$$\frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} = -AR'_r(\psi_{\alpha r}L_s - \psi_{\alpha s}L_\mu) + \psi_{\beta r}\omega;$$

$$\frac{d\psi_{\beta r}}{dt} = -AR'_r(\psi_{\beta r}L_s - \psi_{\beta s}L_\mu) - \psi_{\alpha r}\omega;$$

$$M = \frac{3}{2}pL_\mu A(\psi_{\alpha s}\psi_{\beta r} - \psi_{\beta s}\psi_{\alpha r});$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}pM - M_c,$$

$$\text{де } A = \frac{1}{L_sL_r - L_\mu^2}.$$

З цієї системи рівнянь видно, що для моделювання необхідно знати лише параметри Т-подібної схеми заміщення.

Вирази для напруги живлення мають вигляд:

$$U_{\alpha s} = U_m \cos(\omega_s t) = \sqrt{2}U_n \cos(\omega_s t);$$

$$U_{\alpha s} = U_m \sin(\omega_s t) = \sqrt{2} U_n \sin(\omega_s t).$$

Зв'язок між потокозчепленнями та струмами здійснюється за наступною системою рівнянь:

$$\Psi_{\alpha s} = L_s i_{\alpha s} + L_{\mu} i_{\alpha r};$$

$$\Psi_{\beta s} = L_s i_{\beta s} + L_{\mu} i_{\beta r};$$

$$\Psi_{\alpha r} = L_r i_{\alpha r} + L_{\mu} i_{\alpha s};$$

$$\Psi_{\beta r} = L_r i_{\beta r} + L_{\mu} i_{\beta s}.$$

Слід пам'ятати, що всі змінні, які з індексом α співпадають з реальними змінними за фазою А.

7.2 Порядок виконання роботи

1. Розрахувати коефіцієнти диференціальних рівнянь та структурної схеми за даними АД, які надані (Додаток 2).
2. У пакеті MATLAB-SIMULINK набрати структурну схему моделі та виконати розрахунок перехідних процесів пуску АД.
3. Увести до структурної схеми елементи, що дозволять промодельовати процес зміни навантаження від холостого ходу до номінального. Для прискорення роботи задати не нульові початкові умови для швидкості АД.

7.3 Зміст звіту

1. Таблиці вихідних даних, які запропоновані викладачем.
2. Розрахунки коефіцієнтів.
3. Структурні схеми для всіх варіантів досліджень.
4. Графіки динамічних режимів кутової швидкості та моментів - електромагнітного і статичного.
5. Висновки.

7.4 Питання для підготовки до захисту лабораторної роботи

1. Які припущення використовують при моделюванні асинхронного двигуна в трифазній системі координат?
2. Наведіть систему рівнянь електричної рівноваги для статора і ротора.
3. Назвіть вигляди координатних систем. Охарактеризуйте їх.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

МОДЕЛЮВАННЯ СИНХРОННОГО ДВИГУНА В ОРТОГОНАЛЬНІЙ СИСТЕМІ КООРДИНАТ^o d, q

МЕТА: дослідження режимів пуску і зміни збудження та навантаження на моделі СД в ортогональній системі координат d, q

8.1 Теоретичні відомості

Існує ряд методів моделювання СД. Найчастіше СД моделюють на основі рівнянь, що записані в осях непорушних відносно ротора. Така система диференціальних рівнянь - система Парка-Горева, має вигляд:

$$\frac{d\psi_d}{dt} = U_d - i_d r_a + \omega \psi_q;$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} = U_q - i_q r_a - \omega \psi_d;$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} = U_f - i_f r_f;$$

$$\frac{d\psi_{ed}}{dt} = -i_{ed} r_{ed};$$

$$\frac{d\psi_{eq}}{dt} = -i_{eq} r_{eq};$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{H_j} (\psi_d i_q - \psi_q i_d - M_c),$$

зв'язок між струмами та потокозчепленнями визначається наступною системою рівнянь:

$$i_d = \frac{\psi_d}{x_{2d}} - \frac{\psi_f}{x_{2df}} - \frac{\psi_{ed}}{x_{2ded}};$$

$$i_f = -\frac{\psi_d}{x_{2df}} + \frac{\psi_f}{x_{2f}} - \frac{\psi_{ed}}{x_{2fed}};$$

$$i_{ed} = -\frac{\psi_d}{x_{2ded}} - \frac{\psi_f}{x_{2fed}} + \frac{\psi_{ed}}{x_{2ed}};$$

$$i_q = \frac{\Psi_q}{x_{2q}} - \frac{\Psi_{eq}}{x_{2qeq}};$$

$$i_{eq} = -\frac{\Psi_q}{x_{2qeq}} + \frac{\Psi_{eq}}{x_{2eq}}.$$

Для розрахунку необхідних параметрів, що входять до рівнянь струмів використовуємо формули, що випливають з аналізу схеми заміщення синхронного двигуна.

$$x_{ad} = x_d - x_c; \quad x_{aq} = x_q - x_c.$$

Для неявнополюсного двигуна, $x_d = x_q$, а також $x_d'' = x_q''$, $x_{ad} = x_{aq} = x_d - x_c$.

Індуктивний опір обмотки збудження

$$x_f = x_{cf} + x_{ad},$$

де x_{cf} - індуктивний опір розсіювання обмотки збудження.

Індуктивний опір демпферної обмотки за продольною та поперечною вісями:

$$x_{ed} = x_{ad} + x_{ced}; \quad x_{eq} = x_{aq} + x_{ceq},$$

де індуктивний опір розсіювання контурів демпферної обмотки:

$$x_{ceq} = \frac{x_{ad}(x_q'' - x_c)}{x_{aq} - x_d'' + x_c};$$

$$x_{ced} = \frac{x_{ad}x_f(x_d'' - x_c)}{x_{ad}(x_f - x_d'' + x_c) - x_f(x_d'' - x_c)}.$$

Активний опір контурів демпферної обмотки:

$$r_{ed} = 2\omega_0 T_d' \left(x_{ced} + \frac{x_{ad}x_cx_f}{x_{ad}x_c + x_{ad}x_f + x_cx_f} \right);$$

$$r_{eq} = r_{ed} \frac{2I}{5I}.$$

У нашому випадку, для неявнополюсного двигуна $x_{ced} = x_{ceq}$, $x_{ed} = x_{eq}$.

Додаткові параметри, що входять до рівнянь струмів:

$$D = x_d x_f x_{ed} - x_{ad}^2 (x_d + x_f + x_{ed}) + 2x_{ad}^3;$$

$$Q = x_q x_{eq} - x_{aq}^2;$$

$$x_{2d} = \frac{D}{x_f x_{ed} - x_{ad}^2}; \quad x_{2f} = \frac{D}{x_d x_{ed} - x_{ad}^2}; \quad x_{2ed} = \frac{D}{x_d x_f - x_{ad}^2};$$

$$x_{2df} = \frac{D}{x_{ad} x_{ed} - x_{ad}^2}; \quad x_{2ded} = \frac{D}{x_{ad} x_f - x_{ad}^2}; \quad x_{2fed} = \frac{D}{x_{ad} x_d - x_{ad}^2};$$

$$x_{2q} = \frac{Q}{x_{eq}}; \quad x_{2eq} = \frac{Q}{x_q}; \quad x_{2qeq} = \frac{Q}{x_{aq}}.$$

8.2 Порядок виконання роботи

1. Розрахувати коефіцієнти диференціальних рівнянь та структурної схеми за даними СД, що надані викладачем.
2. У пакеті MATLAB-SIMULINK набрати структурну схему моделі та виконати розрахунок перехідних процесів пуску СД.
3. Ввести до структурної схеми елементи, що дозволять промодельовати процес збудження двигуна. Для прискорення роботи задати не нульові початкові умови для швидкості СД.
4. Ввести до структурної схеми елементи, що дозволять промодельовати процес зміни навантаження від холостого ходу до номінального. Для прискорення роботи задати не нульові початкові умови для швидкості СД.

8.3 Зміст звіту

1. Таблиці вихідних даних, які запропоновані викладачем.
2. Розрахунки коефіцієнтів.
3. Структурні схеми (або їх фрагменти) для всіх варіантів досліджень.
4. Графіки динамічних режимів кутової швидкості, напруги і струму збудження та моментів - електромагнітного і статичного.
5. Висновки.

8.4 Питання для підготовки до захисту лабораторної роботи

1. Які припущення використовуються при моделюванні синхронного двигуна в трифазній системі координат?
2. У чому полягає суть моделювання синхронного двигуна в координатній системі d, q ?
3. Назвіть недоліки і переваги системи d, q порівняно з моделлю у фазній системі координат.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОНВЕЄРА З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНОСТІ СТРІЧКИ

МЕТА: дослідження режимів руху і динамічних навантажень у механічній частині електропривода конвеєра з урахуванням пружності стрічки.

9.1 Теоретичні відомості

Механічна частина конвеєрів є досить складною системою з розподіленими по довжині конвеєра параметрами: масою переміщуваного вантажу, масою і пружністю тягового органа, зусиллям статичного опору. Наявність пружних механічних зв'язків є чинником, що сприяє виникненню коливань, що за несприятливих умов істотно збільшують динамічні навантаження робочого обладнання. Рух системи з розподіленими параметрами описують диференціальні рівняння в часткових похідних, розв'язування яких у загальному випадку являє собою значні математичні труднощі. Для якісного розгляду фізичних процесів, що виникають у пускових режимах конвеєрів, реальна механічна система може бути подана спрощеною динамічною моделлю, у якій розподілені маси, пружності та сили замінені еквівалентними зосередженими. Основою моделі слугує епюра напруг конвеєра в режимі пуску. Як критерій еквівалентності беремо рівність натягів тягового органа на приводному елементі реальної системи і натяги у відповідних точках приводного елемента на моделі.

Основні технічні характеристики конвеєра наведено у таблиці:

Основні технічні характеристики конвеєра

Швидкість стрічки, m/s	v
Погонна вага стрічки, kg/m	q_l
Погонна вага вантажу, kg/m	q_v
Погонна вага:	
холостої стрічки, kg/m	q_x
робочої стрічки, kg/m	q_p

Розрахункову схему динамічної моделі конвеєра з урахуванням пружних властивостей тягового органа подано на рис.9.1.

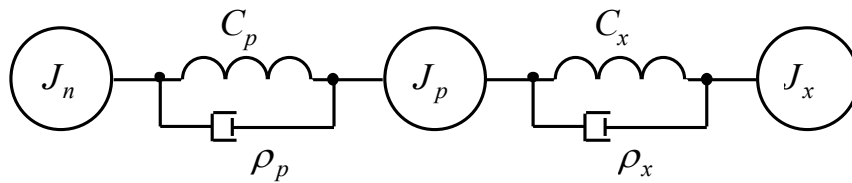


Рисунок 9.1 – Схема динамічної моделі конвеєра

Тут J_n , J_p , J_x - еквівалентний момент інерції приводного барабана, робочої та холостої стрічки конвеєра; C_p , C_x - коефіцієнти жорсткості робочої та холостої стрічки конвеєра; ρ_p , ρ_x - коефіцієнти в'язкого тертя пружного робочого органа для робочої та холостої стрічки.

Структурну схему механічної частини конвеєра з урахуванням пружності тягового органа подано на рис.9.2:

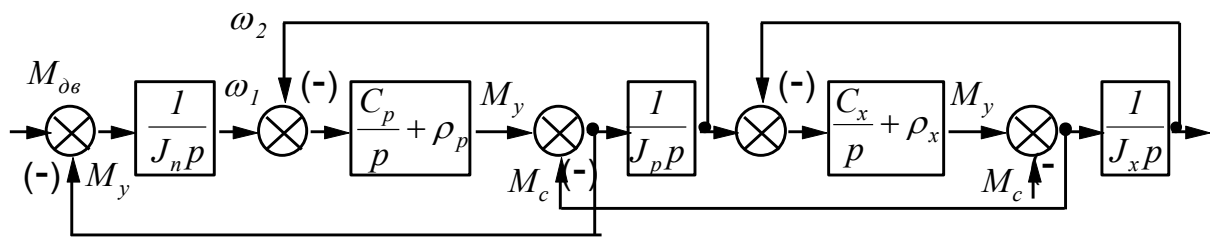


Рисунок 9.2 – Структурна схема механічної частини конвеєра

Основні параметри структурної схеми конвеєра:

– приведений момент інерції холостої стрічки:

$$J_x = L_x(q_l + q_x) \frac{v^2}{\omega_{\partial\partial}^2};$$

– приведений момент інерції робочої стрічки:

$$J_p = L_p(q_l + q_p + q_c) \frac{v^2}{\omega_{\partial\partial}^2};$$

– момент інерції привода:

$$J_n = J_{\partial\partial} + J_{ред} + J_{\delta},$$

де L_x - довжина холостої стрічки конвеєра, J_{δ} - момент інерції барабана, приведений до вала двигуна, момент інерції редуктора $J_{ред} \approx (0.2 \div 0.3)J_{\partial\partial}$

Розглянута структурна схема конвеєра дозволяє визначити пружні моменти і коливання швидкохідності конвеєра в процесі запуску його електропривода. Однак для опису технологічного процесу необхідно також розглянути динамічні властивості конвеєра по каналу «швидкохідність - продуктивність конвеєра».

Якщо як вихідну координату конвеєра розглядати його продуктивність, то конвеєр буде мати передавальну функцію у вигляді ланки транспортного запізнення:

$$W_k = e^{-p\tau},$$

де τ - постійна запізнення конвеєра, що залежить від довжини конвеєра і його швидкохідності;

$$\tau = \frac{l}{v}.$$

При регулюванні кутової швидкохідності привода конвеєра постійна його запізнення може змінюватися в широких межах залежно від діапазону зміни швидкохідності привода.

9.2 Порядок виконання роботи

1. Розрахувати коефіцієнти диференціальних рівнянь та структурної схеми за даними, які надані викладачем.
2. У пакеті MATLAB-SIMULINK набрати структурну схему моделі та виконати розрахунок перехідних процесів пуску конвеєра та зміни швидкохідності. Як приводний двигун взяти АД або ДПС з параметрами, які надані викладачем.

9.3 Зміст звіту

1. Таблиці вихідних даних, які запропоновані викладачем.
2. Розрахунки коефіцієнтів.
3. Структурну схеми досліджень.
4. Графіки динамічних режимів кутової швидкості та моментів - електромагнітного і статичного.
5. Висновки.

9.4 Питання для підготовки до захисту лабораторної роботи

1. Наведіть спрощену розрахункову схему моделі конвеєра з урахуванням пружності стрічки.
2. Наведіть структурну схему механічної частини конвеєра з урахуванням пружності стрічки.
3. Запишіть систему диференціальних рівнянь для механічної частини конвеєра з урахуванням пружності стрічки.
4. Наведіть вирази для розрахунку основних параметрів структурної схеми.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10
РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА МОДЕЛІ ТА
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

МЕТА: визначення параметрів передавальної функції за даними перехідних характеристик

10.1 Теоретичні відомості

Для аналізу і синтезу систем електроприводів необхідно знати їх математичні моделі. Вибір математичної моделі залежить від цілого ряду умов, найважливішими з яких є: мета, котрій модель повинна слугувати; необхідна точність опису реального процесу; критерій адекватності моделі й об'єкта; ступінь вивченості фізичних явищ процесу. В інженерній практиці часто обмежуються представленням об'єкта у вигляді чорного ящика, для якого знаходять зв'язок між входом і виходом. Таке знаходження зв'язків за експериментальними даними називають *ідентифікацією*. За даними ідентифікації визначають параметри і структуру чорного ящика об'єкта.

Вигляділяють п'ять основних методів визначення моделі об'єкта на основі:

- реакції об'єкта на детермінований вхідний сигнал (одиничний стрибок або імпульс);
- частотних характеристик, отриманих у сталому режимі для синусоїдального вхідного сигналу;
- моделювання на ЕОМ при подальшому уточненні параметрів моделі;
- кореляції аналізу входу і виходу;
- підстроюваної динамічної моделі (моделі як датчика характеристик об'єкта).

Метою ідентифікації будемо вважати одержання математичного опису об'єкта у вигляді його передавальної функції на основі експериментальної перехідної характеристики.

Процес ідентифікації об'єкта складається з чотирьох основних етапів:

- планування і підготовки експерименту, проведення експерименту,
- обробка результатів експерименту, що полягає в згладжуванні отриманої перехідної характеристики,
- апроксимації її передавальної функції,
- перевірка адекватності отриманої моделі реальному об'єктові.

Переважаюча кількість об'єктів у системах електропривода мають перехідну характеристику, що відповідає аперіодичній залежності другого порядку. При цьому залежно від характеру процесу для відтворення параметрів передавальної функції використовують ті чи інші методи.

Для виконання лабораторної роботи необхідно використовувати наступні методи згідно з отриманим характером процесу:

Для аперіодичної перехідної характеристики першого порядку:

- апроксимацію елементарною аперіодичною ланкою;
- апроксимацію ланцюжком однакових аперіодичних ланок;
- метод інтервалів;
- метод Z-форм;
- апроксимацію за похибкою.

Для аперіодичної перехідної характеристики другого порядку:

- апроксимацію ланцюжком однакових аперіодичних ланок;
- метод інтервалів;
- метод Z-форм;
- апроксимацію за похибкою розбіжності;
- апроксимацію елементарною аперіодичною ланкою з запізненням;
- метод інтервалів;
- метод площ.

Для коливальної перехідної характеристики:

- апроксимацію коливальною ланкою;
- метод Z-форм;
- апроксимацію за похибкою;
- метод площ.

Методики розрахунку за вказаними методами наведено в літературі [10-19].

10.2 Порядок виконання роботи

1. За диференційним рівнянням (або системою рівнянь), яка надана викладачем скласти структурну схему та розрахувати перехідну характеристику.
2. У пакеті MATLAB-SIMULINK набрати структурну схему моделі та виконати розрахунок.
3. Згідно із запропонованим методом визначення параметрів передавальної функції виконати розрахунки коефіцієнтів та сталих часу.
4. Розрахувати перехідну характеристику, використовуючи отримані результати.
5. Побудувати задану та відтворену перехідні характеристики на одному графіку. Знайти розбіжності та встановити похибку.

10.3 Зміст звіту

1. Таблиці вихідних даних.
2. Розрахунки коефіцієнтів.
3. Структурну схеми досліджень.
4. Графіки динамічних режимів наданої та відтвореної перехідної характеристик.
5. Висновки.

10.4 Питання для підготовки до захисту лабораторної роботи

1. Дайте визначення „ідентифікації”.
2. Які існують методи створення моделі об’єкта?
3. З яких основних етапів складається процес ідентифікації?

Таблиця 1 – Параметри двигуна постійного струму

Тип двигуна	P _н , кВт	U _н , В	I _н , А	n _н , об/хв	R _я , Ом	К.К.Д., %	J, Н·м
2ПН90М	0,71	220	4,6	2360	6,54	0,7	0,04
2ПН90М	1,0	220	6,3	3000	3,99	0,725	0,04
2ПН90L	1,3	220	7,6	3150	2,232	0,78	0,05
2ПН100L	1,7	220	9,9	2200	2,023	0,78	0,12
2ПН100М	2,0	220	11,5	3000	1,375	0,79	0,11
2ПН100L	2,2	220	12,3	3150	1,03	0,81	0,12
2ПН112М	2,5	220	15,0	2200	1,47	0,76	0,15
2ПН112L	3,4	220	18,8	2200	0,824	0,78	0,18
2ПН132М	4,0	220	23,0	1500	0,9	0,79	0,38
2ПБ132М	4,5	220	25,1	3150	0,333	0,815	0,38
2ПБ132L	5,3	220	28,2	3000	0,291	0,855	0,48
2ПО132L	6,7	220	35,4	3000	0,209	0,86	0,48
2ПФ132М	7,5	220	40,1	3000	0,234	0,85	0,38
2ПФ132L	11,0	220	58,5	3000	0,148	0,855	0,48
2ПН160М	13,0	220	69,1	2120	0,137	0,855	0,83
2ПН160L	16,0	220	84,1	2360	0,075	0,865	1,0
2ПН160М	18,0	220	94,0	3150	0,061	0,87	0,83
2ПН180М	26,0	220	134,3	2240	0,063	0,88	2,0
2ПН180М	37,0	220	187,9	3000	0,037	0,895	2,0
2ПН180М	15,0	220	79,7	1500	0,14	0,855	2,0
2ПН180М	8,0	220	43,8	1060	0,303	0,83	2,0
2ПН180М	5,6	220	32,2	750	0,559	0,79	2,0
2ПФ160М	6,0	220	34,5	1000	0,534	0,79	0,83
2ПФ160М	4,2	220	26,2	750	0,923	0,73	0,83
2ПО160L	3,2	220	18,4	750	0,939	0,79	1,0
2ПБ160М	2,1	220	12,5	750	1,71	0,765	0,83
2ПБ132М	1,1	220	7,5	800	3,97	0,67	0,38

Вар.	Тип двиг.	P_{2H} , [кВт]	U_H [В]	$I_{я}$, [А]	n_H [об/хв]	$R_{я}$ [Ом]	$L_{я} \cdot 10^{-3}$ [Гн]	$J \cdot 10^{-3}$ [кг/м ²]
1	МИ-22	0,37	60	8,2	3000	0,195	1	4
2	МИ-22	0,25	60	5,5	2000	0,36	2	4
3	МИ-31	0,45	60	10,3	3000	0,118	3	9
4	МИ-31	0,37	110	4,4	2000	0,757	5	9
5	МИ-32	0,76	110	8,2	2500	0,237	1,7	13,25
6	МИ-32	0,45	110	5,0	1500	0,605	4,5	13,25
7	МИ-32	0,37	110	4,2	1000	1,46	8,5	13,25
8	МИ-41	1,6	110	19,2	2500	0,147	1	40
9	МИ-41	1,1	110	13,0	1500	0,42	2,5	40
10	МИ-42	3,2	110	36,3	2500	0,06	0,4	65
11	МИ-42	1,6	110	18,2	1500	0,192	1,5	65
12	МИ-42	1,1	110	12,6	1000	0,435	3	65

Таблица 2 – Параметры асинхронного двигателя

Вариант	Тип двиг.	P_H [кВт]	n_H [об/хв]	η , %	$\cos \varphi$	I_H [А]	$k = \frac{I_{II}}{I_H}$	$\frac{M_{II}}{M_H}$		J [кг·м ²]
$U_H=380В$										
1	RA71B2	0,55	2850	74	0,84	1,8	6,5	2,3	2,4	0,0005
2	RA80A2	0,75	2820	74	0,83	2	5,3	2,5	2,7	0,0008
3	RA80B2	1,1	2800	77	0,86	2	5,2	2,6	2,8	0,0012
4	RA80A4	0,55	1400	71	0,8	1	5	2,3	2,8	0,0018
5	RA80B4	0,75	1400	74	0,8	2	5	2,5	2,8	0,0023
6	RA90S2	1,5	2835	79	0,87	3	6,5	2,8	3	0,0010
7	RA90L2	2,2	2820	82	0,87	4	6,5	2,9	3,4	0,0015
8	RA100LA4	2,2	1420	79	0,82	5	6	2,2	2,6	0,0048
9	RA100LB4	3	1420	81	0,81	7	6,2	2,2	2,6	0,0058
10	RA112M2	4	2895	84	0,87	9	6,8	2,2	3,3	0,0082
11	RA112M2	4	2895	84	0,87	9	6,8	2,2	3,3	0,0082
12	RA112M4	4	1430	85,5	0,84	9	6,5	2,2	2,9	0,0103
13	RA132SA2	5,5	2880	89	0,89	11	6,5	2,4	3	0,0155
14	RA132SB2	7,5	2890	89	0,89	15	7	2,5	3,2	0,0185

Таблица 4 – Параметры асинхронного двигателя

Вар	Тип двиг	P_n , кВт	n_n , об/мин	η_n , %	$\cos \varphi_n$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{M_k}{M_{ном}}$	R_l , Ом	x_l , Ом	R'_2 , Ом	x'_2 , Ом
$U_n = 380В, n_0 = 3000 об / хв$											
1	4A100L2	5.5	2898	87.5	0.91	2	2.5	1	1.1	0.75	2.3
2	4A112M2	7.5	2925	87.5	0.88	2	2.8	0.68	0.85	0.41	2.1
3	4A132M2	11	2931	88	0.9	1.7	2.8	0.41	0.63	0.26	1.24
4	4A160S2	15	2937	88	0.91	1.4	2.2	0.4	0.7	0.17	0.93
5	4A160M2	18	2937	88.5	0.92	1.4	2.2	0.31	0.89	0.14	0.74
6	4A180S2	22	2943	88.5	0.91	1.4	2.5	0.21	0.48	0.12	0.58

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	КПД, %	Ток статора, А	Напряжение возбужде- ния, В	Ток возбуж- дения, А	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{M_p}{M_{ном}}$	$\frac{M_{s=0,05}}{M_{ном}}$	$\frac{I_p}{I_{ном}}$
СДКП2-18-26-16УХЛ4	800	93,8	92	59	260	2	0,7	1	4,5
СДКП2-18-34-16УХЛ4	1000	94,6	110	70	250	2	0,8	0,8	5
СДКП2-18-41-16УХЛ4	1250	94,8	140	75	256	2,1	0,9	0,9	5
СДКП2-19-39-16УХЛ4	2000	95,6	225	80	270	1,9	0,8	1,2	5,5
СДКП2-19-61-16УХЛ4	3150	96,2	355	105	270	1,9	0,8	1,3	5,5
СДКП2-20-49-16ФУХЛ4	4000	96,2	445	110	240	1,9	0,7	1,2	5
СДКП2-20-56-16ФУХЛ4	4000	96	265	100	285	1,9	1	1,5	6,5
СДКП2-20-61-16ФУХЛ4	5000	96,5	550	125	240	1,8	0,8	1,3	5,5
СДКП2-21-46-20ФУХЛ4	5000	96,3	550	146	265	1,9	0,8	1	5,5
СДКП2-21-56-24ФУХЛ4	5000	96,3	555	170	260	1,8	0,8	1,3	5,5
СДКП2-18-51-16МФУХЛ4	1600	95,5	179	89	230	2,1	0,65	1,1	5,5
СДКП2-19-39-16МФУХЛ4	2000	95,6	225	80	270	1,9	0,8	1,2	5,5
СДКП2-20-61-16МФУХЛ4	5000	96,5	550	125	240	1,8	0,8	1,3	5,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башарин А.В., Постников Ю.В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ: Учебное пособие для вузов.-3-е изд.- Л.:Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990.-512с.
2. Богрый В.С., Русских А.А. Математическое моделирование тиристорных преобразователей. - М.: Энергия, 1972. -184с.
3. Стульников В.И., Колчев Е.В. Моделирование полупроводниковых преобразователей.-К.:Техника, 1971.-107с.
4. Соколов М.М., Петров Л.П., Масандилов Л.Б., Ладинзон В.А. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе.- М.:Энергия, 1967.-200с.
5. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г.Мамиконянца. - 4-е изд-е, переработ. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1984.-240с.
6. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. - М.: Энергия, 1974. - 328 с.
7. Булгаков А.А. Основы динамики управляемых вентильных систем. - М.: изд-во АН СССР, 1963.
8. Загорский А.Е., Шакарян Ю.Г. Управление переходными процессами электрических машин переменного тока.-М.: Энергоатомиздат,1986.-176с.
9. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. - Л.:Энергия, 1980. - 256с.
10. Дехтяренко П.И., Коваленко В.П. Определение характеристик звеньев систем автоматического регулирования. -М.: Энергия, 1973.-120с.
11. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Пер. с англ.- М.:Мир, 1975.-683с.
12. Балакирев В.С., Дудников Е.Е., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов регулирования.- М.: Энергия, 1967.- 232с.

13. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов.- М.: Энергия, 1979.- 240с.
14. Ротач В.Я. Расчет динамических промышленных автоматических систем регулирования.- М.: Энергия, 1973.- 440с.
15. Симою М.П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев и систем авторегулирования.- Автоматика и техника.-Мн.: Выш. шк.- 1957. N 6. Т.18. - с.514-528.
16. Кулаков Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: Спр. пособие.- Мн.: Выш. шк., 1984.- 192с.
17. Определение динамических параметров электропривода постоянного тока методом пространства состояний / А.К. Дука// Электромашиностроение и электрооборудование : Респ.межвед.науч.-техн.сб., 1987.-Вып.41.-С.9-14.
18. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. Справочник. - М.: Наука. Гл.ред. физ.мат . лит., 1987.-240 с.
19. Методы и программы для исследования систем автоматизации: Учеб.пособие / А.И.Кубрак, А.И.Жученко, Л.Д.Ярощук. - К.: УМК ВО, 1989, - 228 с.

З М І С Т

Вступ	3
Лабораторна робота №1. Складання структурних схем за диференціальними рівняннями та їх системами	4
Лабораторна робота №2. Моделювання механічної системи з пружностями	7
Лабораторна робота №3. Моделювання двигуна постійного струму незалежного збудження	11
Лабораторна робота №4. Моделювання асинхронного двигуна за лінеаризованою моделлю	14
Лабораторна робота №5. Моделювання синхронного двигуна за лінеаризованою моделлю	18
Лабораторна робота №6. Моделювання замкнутих систем електропривода	21
Лабораторна робота №7. Моделювання асинхронного двигуна в координатній системі α, β	24
Лабораторна робота №8. Моделювання синхронного двигуна в координатній системі d, q	26
Лабораторна робота №9. Моделювання механічної частини електропривода конвеєра з урахуванням пружності стрічки	29
Лабораторна робота №10. Розрахунок перехідних характеристик на моделі та визначення параметрів передавальної функції електромеханічної системи	33
Список літератури	36

Навчальне видання

Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Енергоефективний електропривод» для студентів для студентів зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка», електроенергетичний факультет / укл. Д. А. Шокар'єв. – НТУ «ХПІ», 2018. - 44 с.

Українською мовою

Укладач ШОКАР'ЄВ Дмитро Анатолійович

Відповідальний за випуск проф. Лазуренко О. П.

Роботу до видання рекомендував —————

В авторській редакції

План 2018 р., поз. 6

Підп. до друку . . р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. Друк – ризографія.

Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 6,5. Наклад 50 прим. Зам. № . Ціна договірна Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3652 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ «ХПІ», 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21